

## IMBUNĂȚIREA FACTORULUI DE PUTERE

În domeniul energiei electrice, una din căile de conservare a resurselor energetice o reprezintă îmbunătățirea factorului de putere și gospodărirea judicioasă a energiei reactive în sistemul electroenergetic.

Un factor de putere ridicat reduce circulația de putere reactivă din centralele electrice spre consumatori, micșorând pierderile de energie electrică până la un nivel minim determinat de consumul tehnologic propriu.

Se obține astfel o creștere a randamentelor instalațiilor de transport, transformare și distribuție a energiei electrice, a siguranței de funcționare și o mai bună utilizare a rețelei electrice prin reducerea puterii aparente cu care este încărcată.

### 1. Factorul de putere

Se definește *factorul de putere* ca raportul între puterea activă și puterea aparentă:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (1)$$

Cu alte cuvinte, factorul de putere arată ce cantitate din puterea aparentă reprezintă puterea activă.

În regim permanent sinusoidal:

$$FP = \frac{S \cdot \cos \varphi}{S} = \cos \varphi \quad (2)$$

deci factorul de putere este egal cu cosinusul unghiului de defazaj dintre tensiune și curent, putând varia în intervalul (0, 1).

Când factorul de putere are valoarea sa maximă, adică  $\cos \varphi = 1$ , puterea activă devine  $P = UI$  și are valoare maximă, egală cu puterea aparentă. Prin urmare puterea aparentă  $S$  este puterea activă maximă care poate să fie dată de o sursă pentru o anumită tensiune  $U$  și un anumit curent  $I$ .

Inegalitatea dintre puterea aparentă și cea activă se datorează faptului că în afară de curentul activ  $I_a$ , în fază cu tensiunea, receptorul mai absoarbe un curent reactiv, defazat cu  $\pi/2$  în urma tensiunii (la receptorii inductivi), necesar magnetizării circuitelor magnetice ale receptorului. Corespunzător, receptorul absoarbe o putere reactivă:

$$Q = UI \times \sin \varphi = UI_r \quad (3)$$

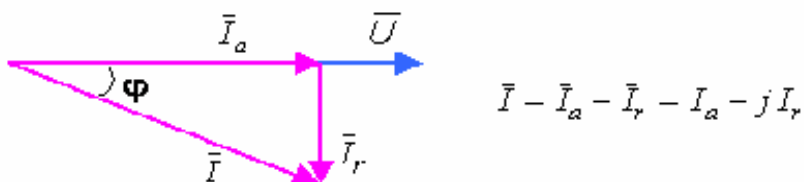


Fig.1. Diagrama fazorială a curenților într-un circuit de c.a. cu consumator inductiv

Pentru ca o anumită instalație, de putere aparentă nominală dată, să funcționeze cu maximum de putere activă, adică cu maximum de eficacitate, factorul de putere corespunzător trebuie să fie cât mai mare (mai apropiat de unitate), adică defazajul dintre tensiune și curent să fie cât mai mic (mai apropiat de zero).

Unii receptori cum ar fi: motoarele asincrone de turație mică, motoarele asincrone de turație mare când funcționează cu sarcină mică sau în gol, transformatoarele de rețea când funcționează în gol, cuptoarele de inducție, transformatoarele de sudură etc., înrăutățesc (micșorează) factorul de putere.

Factorul de putere mediu al unei unități, sau subunități industriale se calculează cu relația:

$$\cos \varphi_{med} = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi_{med}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{W_r^2}{W_a^2}}} \quad (4)$$

unde :

$$\tan \varphi_{med} = \frac{UI \sin \varphi_{med} \cdot t}{UI \cos \varphi_{med} \cdot t} = \frac{W_r}{W_a} \quad (5)$$

în care energia reactivă  $W_r$  și energia activă  $W_a$  sunt înregistrate cu contoare în același interval de timp  $t$  (de exemplu o lună).

Dacă  $\cos \varphi_{med}$  are o valoare sub cea stabilită, unitatea consumatoare de energie electrică este obligată să plătească o anumită penalizare, cu atât mai mare cu cât  $\cos \varphi_{med}$  este mai mic.

Factorul de putere stabilit în instalațiile electrice în lipsa surselor specializate de compensare a puterii reactive se numește *natural*. Factorul de putere minim pe care trebuie să-l asigure consumatorul la punctul de delimitare cu rețeaua furnizorului pentru a nu plăti energia reactivă consumată se numește *neutral*; este stabilit la 0,92.

Factorul de putere pentru care cheltuielile de investiție și exploatare sunt minime se numește *optim*; el este determinat pe baza unui calcul tehnico-economic.

## 2. Cauzele scăderii factorului de putere (creșterea consumului de putere reactivă)

Marea majoritate a sarcinilor electrice consumă nu numai putere activă, ci și putere reactivă; în cazul motoarelor și transformatoarelor, este necesară pentru magnetizare, iar în cazul convertizoarelor statice, pentru control și comutație.

a) Liniile electrice aeriene sunt consumatoare de putere reactivă datorită inductanței proprii  $L$ , dar și generatoare de putere reactivă datorită capacității lor față de pământ  $C$ . În ansamblu, bilanțul puterii reactive poate fi excedentar sau deficitar, în funcție de raportul dintre cele două componente.

b) Motoare electrice. Puterea reactivă absorbită de un motor asincron este determinată în mare parte de puterea reactivă absorbită la mers în gol  $Q_0$ , puterea reactivă absorbită de un motor asincron variază puțin cu sarcina. Puterea reactivă la mersul în gol se poate determina în raport cu puterea nominală  $P_n$  și numărul de poli.

c) Transformatoare electrice. Un transformator cu puterea aparentă  $S$  absoarbe puterea reactivă  $Q$  compusă din puterea reactivă de mers în gol  $Q_0$  și puterea reactivă asociată tensiunii de scurtcircuit și încărcării transformatorului.

d) Lămpile cu descărcări în vapori metalici în scheme cu balast inductiv, necompensate.

e) Executarea unor reparații necorepunzătoare la motoare:

$U = f(w_1 \phi_m)$  tensiunea la bornele motorului este proporțională cu numărul de spire în creștătura statorului,  $w_1$ . Reducerea acestuia determină o creștere a fluxului  $\phi_m$ , în consecință a solenației de magnetizare și consecutiv a curentului de magnetizare, ducând la creșterea puterii reactive consumate.

### 3. Efectele scăderii factorului de putere

Un factor de putere redus are o serie de consecințe negative asupra funcționării rețelei electrice, printre care:

- creșterea pierderilor de putere activă;
- investiții suplimentare;
- creșterea pierderilor de tensiune în rețea;
- reducerea capacității instalațiilor energetice.

a) Supradimensionarea instalațiilor de producere, transport și distribuție a energiei electrice și implicit, creșterea valorilor de investiții. Dimensionarea se face pe baza intensității curentului electric. Pentru o aceeași putere activă, odată cu scăderea factorului de putere, respectiv cu creșterea puterii reactive crește curentul, ceea ce duce la majorarea dimensiunilor elementelor instalației.

b) Creșterea pierderilor de putere activă. Pierderile de putere variază direct proporțional cu pătratul puterii reactive și invers proporțional cu pătratul factorului de putere.

$$\Delta P = Z I^2 = Z \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \varphi} \quad (6)$$

c) Scăderea capacității de încărcare a instalațiilor cu putere activă.

Pentru o anumită putere aparentă  $S$ , pe măsură ce crește puterea reactivă  $Q$ , scade puterea activă  $P$ . Dar, conform cu relația de definiție a puterii reactive, puterea reactivă crește atunci când crește  $\sin \varphi$ , deci când crește unghiul de defazaj  $\varphi$  și scade factorul de putere  $\cos \varphi$ . Consumatorii care au bobine cu inductanțe mari (unele mașini electrice, transformatoare etc.) defazează mult curentul absorbit, în urma tensiunii (unghi de defazaj mare), astfel încât cer o importantă putere reactivă, făcând ca prin aceasta să scadă factorul de putere al sursei care alimentează rețeaua care nu poate da în consecință decât o putere activă  $P$  mică. De aici interesul de a avea un factor de putere cât mai mare la consumatori.

Elementele rețelei electrice care alimentează consumatorul cu o putere activă  $P_1$  la un factor de putere  $\cos \varphi_1$  se dimensionează pentru producerea, transportul sau/și transformarea puterii aparente  $S = P_1 / \cos \varphi_1$ . Îmbunătățirea factorului de putere la o valoare  $\cos \varphi_2$  face posibilă mărirea puterii active ce poate fi consumată cu aceeași structură a rețelei electrice la valoarea  $P_2 = S \cdot \cos \varphi_2$ .

#### Exemplu

Dacă o întreprindere oarecare absoarbe o putere activă de 80 kW la un factor de putere  $\cos \varphi = 0,5$ , puterea instalată la transformator va trebui să fie:

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{80}{0,5} = 160 \text{ kVA}$$

Dacă factorul de putere ar fi  $\cos \varphi = 0,8$ , puterea transformatorului poate fi:

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{80}{0,8} = 100 \text{ kVA}$$

d) Creșterea pierderilor de tensiune în rețea. Pe lângă scăderea capacității de încărcare a rețelei, transportul puterii reactive produce pierderi de tensiune suplimentare față de cele produse de puterea activă; odată cu creșterea valorii puterii reactive  $Q$  crește și valoarea pierderilor de tensiune, ceea ce conduce la necesitatea supradimensionării secțiunii conductoarelor rețelei.

$$\Delta U = Z \cdot I = Z \frac{P}{U \cos \varphi} \quad (7)$$

e) Scăderea numărului de receptori conectați la bornele centralelor.

$$n = \frac{I_m}{I} = \frac{I_m U \cos \varphi}{P} \quad (8)$$

$I_m$  - curentul maxim debitat de centrala;

$I$  - curentul absorbit de unul dintre receptoare (identice);

$n$  - numărul de receptoare identice conectate la bornele centralei.

#### 4. Compensarea puterii reactive

Mărirea factorului de putere sau, cum se spune, *îmbunătățirea factorului de putere* pentru o instalație dată va duce la micșorarea curentului total absorbit și prin aceasta, la posibilitatea de a conecta noi receptori la aceeași rețea.

În cazul unei instalații noi proiectate, luând toate măsurile ca factorul de putere să fie cât mai mare, instalația proiectată va fi mai economică (secțiunea conductoarelor mai mică, puterea postului de transformare mai mică).

În prezent, puterile cerute de întreprinderi de la sistemul energetic sunt din ce în ce mai mari. În consecință, problema factorului de putere are o importanță deosebită.

Îmbunătățirea factorului de putere se poate face pe două căi:

- prin măsuri organizatorice, cu ajutorul cărora factorul de putere este mărit fără nici un fel de investiții;
- prin producerea puterii reactive la fața locului prin utilizarea unor surse specializate de putere reactivă.

##### *Mijloace naturale de reducere a consumului de putere reactiva*

Sursa principală a consumului de putere reactivă este în utilizarea **motoarelor asincrone** și a transformatoarelor în regim de încărcare redusă.

##### a) *Motoare electrice*

Reducerea consumului de putere reactivă se obține prin utilizarea rațională a motoarelor electrice, astfel încât să fie încărcate, pe cât posibil, la o putere de cel puțin 0,75 din puterea lor nominală, astfel:

- înlocuirea motoarelor subîncărcate cu motoare de putere mai mică, încărcate cât mai aproape de sarcina nominală;

- funcționarea cu înfășurările statorului în conexiunea stea în perioadele de sarcină redusă sub 1/3 din sarcina nominală revenind la conexiunea normală triunghi în perioadele de sarcină nominală.

Aceasta se admite numai la motoarele la care încărcarea nu depășește (0,4 , 0,5) din puterea nominală și se poate aplica numai la motoarele la care pornirea se face cu comutator stea-triunghi. Trebuie amintit însă că, trecând de la conexiunea stea, cuplul de pornire și cuplul maxim al motorului scade de trei ori. În instalațiile electrice moderne, la care sarcina motorului variază în decursul timpului, se utilizează comutatoarele stea-triunghi automate, care la scăderea sarcinii

motorului schimbă conexiunile pe stea, iar la creșterea sarcinii, revin pe conexiunea triunghi în mod automat, în funcție de curentul care trece prin motor;

- întreruperea funcționării motorului pentru durate de mers în gol mai mari de 10 s (metoda se recomandă și la transformatoarele de sudură);

- folosirea **motoarelor sincrone** la puteri peste 100 kW, dacă nu este necesară reglarea turației. Motoarele sincrone pot funcționa cu factor de putere  $\cos\varphi = 1$  și în plus, pot produce energie reactivă pe care o injectează în rețea.

- sincronizarea motoarelor asincrome mari.

Aplicarea uneia sau alteia dintre metodele naturale este justificată pe baza unui calcul tehnico-economic.

#### b) *Transformatoare electrice*

Reducerea consumului de putere reactivă se obține prin:

- înlocuirea unui transformator subîncărcat cu altul de putere mai mică (problema înlocuirii se pune la încărcări sub 50% din puterea nominală mai mult de 1500 h/an);

- funcționarea transformatoarelor conectate în paralel în rețeaua de distribuție a unui consumator după un grafic de pierderi minime.

#### *Surse specializate de putere reactivă*

Instalarea surselor specializate de putere reactivă în scopul îmbunătățirii factorului de putere până la valoarea cerută - neutrală sau optimă - se ia în considerare după ce au fost epuizate mijloacele naturale de reducere a consumului de putere reactivă.

Ca soluții de reducere a pierderilor de energie se adoptă, pentru transportul energiei electrice, montarea unor transformatoare electrice ridicătoare (după generator) și coborâtoare (înaintea receptorului), iar pentru îmbunătățirea (creșterea factorului de putere), montarea în paralel cu receptorul, a unor condensatoare (pentru defazaj inductiv) și a unor bobine (pentru defazaj capacitiv).

Producerea puterii reactive chiar la întreprindere se realizează cu ajutorul mașinilor de curent alternativ sincrone sau cu ajutorul condensatoarelor; ele absorb din rețea o putere reactivă capacitivă, care compensează puterea reactivă inductivă, necesară magnetizării circuitelor magnetice, ceea ce înseamnă, cu alte cuvinte, că acești receptori produc putere reactivă inductivă.

Mașinile sincrone folosite sunt motoarele sincrone obișnuite sau generatoarele sincrone special construite pentru producerea puteri reactive, numite compensatoare sincrone.

În rețeaua de distribuție a consumatorului se utilizează condensatoarele; compensatoarele sincrone (la puteri mai mari de 20 MVar) sunt recomandate în rețeaua de transport de înaltă tensiune sau în unitățile de producere a energiei electrice.

Dacă factorul de putere al unui receptor este  $\cos\varphi_1$  și din motive tehnico-economice este necesar să se compenseze până la valoarea  $\cos\varphi_2$ , rezultă că puterea reactivă a elementului compensator (condensator sau bobină) este:

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (9)$$

Dacă receptorul este inductiv (cazul practic cel mai răspândit) elementul compensator (condensatorul) are capacitatea:

$$C = \frac{Q_c}{\omega U^2} = \frac{P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)}{\omega U^2} \quad (10)$$

În mod similar se obține și inductanța elementului compensator (bobină) dacă receptorul este capacitiv:

$$L = \frac{U^2}{\omega Q_c} = \frac{U^2}{\omega P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)} \quad (11)$$

Pentru îmbunătățirea factorului de putere se folosesc și baterii de condensatoare. Capacitatea  $C$  a unei baterii de condensare legate în triunghi, pentru a compensa o putere reactivă  $Q$ , absorbită de un grup de receptori la tensiunea  $U$ , se determină cu ajutorul relației:

$$C = \frac{Q_c}{3\omega U^2} \quad (12)$$

Compensarea puterii reactive se poate face:

- individual – instalând condensatoare (baterii) lângă fiecare receptor în parte;
- pe grupe – instalând bateria la plecarea cablurilor unui grup de receptori mai importanți;
- centralizat – instalând bateria de condensatoare în stația de transformare principală a întreprinderii.

Acest ultim procedeu descarcă de putere reactivă numai sistemul energetic care alimentează exploatarea. Prima și a doua varianta permit reducerea puterii transformatoarelor și a secțiunii cablurilor chiar în cadrul exploatării, însă complică instalațiile acestea.

Calculul tehnico-economic arată că este rațional ca factorul de putere să fie îmbunătățit până la (0,9 ; 0,95).

În fig.2 este reprezentată o sursă de c.a. care alimentează cu tensiunea  $U$  un receptor inductiv (care conține element reactiv inductiv și rezistor).

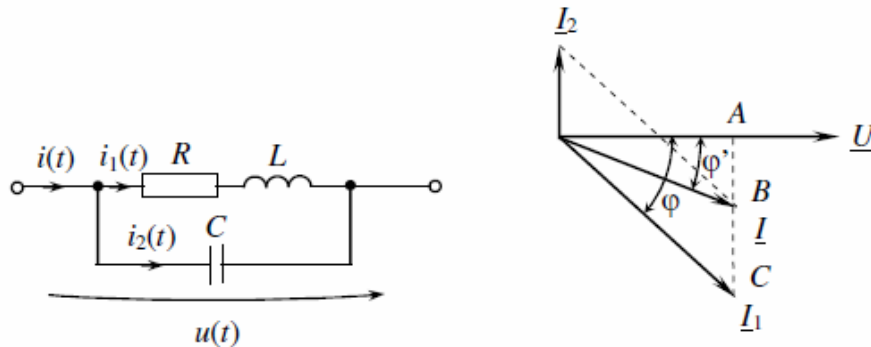


Fig.2. Circuit c.a. cu consumator RL compensat: a) schema electrică echivalentă; b) diagrama fazorială a mărimilor de stare

Curentul  $I_1$  absorbit de acest receptor este defazat în urma tensiunii  $U$  cu unghiul  $\varphi$ . În paralel cu receptorul inductiv se leagă un condensator de capacitate  $C$ . În diagrama fazorială să ia drept origine de fază vectorul tensiunii  $\underline{U}$ . Se trasează vectorul  $\underline{I}_1$  Curentul  $\underline{I}_2$  ce trece prin condensator este reprezentat printr-un vector defazat cu unghiul  $\pi/2$  înaintea vectorului tensiunii  $U$ . Curentul total  $\underline{I}$  se obține din compunere vectorilor  $\underline{I}_1$  și  $\underline{I}_2$ .

Vectorul  $\underline{I}$  este defazat față de tensiunea  $\underline{U}$  cu un unghi  $\varphi'$  mai mic decât unghiul de defazaj  $\varphi$  în cazul când nu există condensator. Cu ajutorul condensatorului se obține un factor de putere  $\cos \varphi'$  mai mare decât factorul de putere inițial  $\cos \varphi$ . În consecință condensatorul permite îmbunătățirea factorului de putere.

Îmbunătățirea factorului de putere cu ajutorul condensatoarelor într-un regim deformant ridică probleme de care trebuie să se țină seama. Prezența condensatoarelor conduce la amplificarea regimului deformant, în sensul că dacă tensiunile aplicate sunt periodice nesinusoidale curenții ce rezultă sunt mult mai deformați. Datorită acestui fapt este posibil ca prin

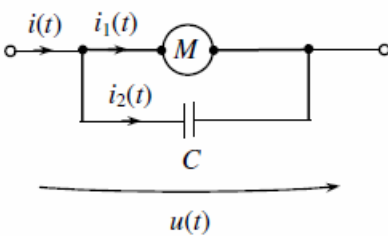
conectarea în rețea a unor condensatoare în scopul măririi factorului de putere să crească sensibil puterea aparentă ca urmare a creșterii puterii deformante, rezultând astfel un efect contrar, nedorit. De aceea, pentru îmbunătățirea factorului de putere în regim deformant trebuie să se pună condiția minimizării puterii complementare. O soluție care se aplică în practică constă în folosirea filtrelor de armonici. Aceste filtre, realizate prin conectarea în serie cu condensatoarele a unor bobine corespunzător alese, fiind acordate de frecvențele armonicilor care urmează să fie atenuate, reprezintă teoretic un scurtcircuit pentru frecvențele respective.

O contribuție importantă în acest domeniu este realizarea unui aparat complex pentru măsurarea puterilor (activă, reactivă și deformantă) ce intervin într-un regim deformant.

### Exemplu de calcul

Un motor electric  $M$  alimentat cu o tensiune alternativă  $U = 220 \text{ V}$ , de frecvență  $f = 50 \text{ Hz}$ , absoarbe un curent cu valoarea efectivă  $I_M = 16 \text{ A}$  la un factor de putere  $\cos\varphi_M = 0,6$ . Ce capacitate  $C$  și ce putere reactivă  $Q$  trebuie să aibă condensatorul montat în paralel cu motorul, pentru ca factorul de putere al instalației să devină  $\cos\varphi_M = 0,8$ ?

Rezolvare:



Se consideră diagrama fazorială din fig.2.b, unde s-a luat ca origine de fază tensiunea  $U$  și s-a trasat apoi vectorul curentului  $I_1$  defazat cu unghiul  $\varphi$  față de  $U$ . Curentul absorbit de condensator și defazat cu  $\pi/2$  înaintea tensiunii  $U$ , compus vectorial cu curentul  $I_1$  va da un curent total  $I$  defazat cu unghiul  $\varphi'$  în urma tensiunii  $U$ .

Observând diagrama se poate scrie:

$$I_1 \cos\varphi = I \cos\varphi'$$

de unde:

$$I = \frac{\cos\varphi}{\cos\varphi'} I_1 = \frac{0,6}{0,8} 16 = 12 \text{ A}$$

$$\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi} = \sqrt{1 - 0,6^2} = 0,8$$

$$\sin\varphi' = \sqrt{1 - \cos^2\varphi'} = \sqrt{1 - 0,8^2} = 0,6$$

Rezultă:

$$AC = I_1 \sin\varphi = 16 \times 0,8 = 12,8$$

$$AB = I \sin\varphi' = 12 \times 0,6 = 7,2$$

În consecință  $BC = AC - AB = 12,8 - 7,2 = 5,6$ .

Curentul absorbit de condensator este deci  $I_2 = 5,6 \text{ A}$ .

$$\text{Deoarece } I_2 = \omega C U, \text{ rezultă } C = \frac{I_2}{\omega U} = \frac{5,6}{314 \cdot 220} = 81 \mu\text{F}$$

Puterea reactivă a condensatorului este:

$$Q = UI_2 = 220 \times 5,6 = 1232 \text{ VAR} = 1,232 \text{ kVAR.}$$